

Imaginer des transitions vers une Suisse sobre en carbone: Une évaluation économique¹

F. Babonneau – P. Thalmann – M. Vielle²

Laboratoire d'Economie Urbaine et de l'Environnement (leure.epfl.ch)

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne



Résumé :

Cette étude présente la contribution Suisse au projet *Deep Decarbonization Pathways* (DDPP) qui représente une plateforme internationale collaborative visant à déterminer et à comprendre comment aller vers des économies sobre en carbone, permettant ainsi de maintenir le réchauffement global de notre planète en dessous de 2°C. Le projet DDPP est animé par le Sustainable Development Solutions Network (SDSN) et par l'Institut du développement durable et des relations internationales (IDDR). L'administration helvétique et en particulier l'Office Fédéral de l'Environnement (OFEV) a décidé de contribuer au projet en développant sa vision nationale d'une trajectoire de décarbonisation à l'horizon 2050.

L'étude Suisse est basée sur des simulations du modèle macro-économique GEMINI-E3, un modèle d'équilibre général calculable utilisé pour évaluer les implications énergétiques et économiques d'une société suisse sobre en carbone. Les scénarios DDPP helvétiques visent un niveau d'émission par habitant d'une tonne de CO₂ en 2050.

Notre étude détaille différentes options et différents scénarios compatibles avec cet objectif. Celui s'avère très ambitieux, en particulier compte tenu de la décision de la Suisse de se passer graduellement

¹ Ce travail a fait l'objet d'un financement de l'Office Fédéral de l'Environnement. Nous tenons à remercier l'ensemble du groupe d'accompagnement du projet animé par J. Roméro, INFRAS (en les personnes de R. Iten et J. Füssler) et P. Criqui pour leurs nombreux commentaires, suggestions et remarques sur ce travail.

² Pour toute correspondance sur ce papier s'adresser à marc.vielle@epfl.ch.

du nucléaire pour sa production d'électricité. L'efficacité énergétique apparaît comme un élément clef de cette stratégie, de même que certaines options technologiques comme le captage et stockage du carbone (CSC). Le papier évalue le coût économique et le prix du carbone associés à chacun des scénarios et compare ces résultats avec ceux d'autres études.

I. Introduction

Cet article présente les résultats de simulations du modèle économique GEMINI-E3 analysant des transitions vers une économie suisse sobre en carbone à l'horizon 2050 et réalisées dans le cadre du *Deep Decarbonization Pathways project* (DDPP). Le DDPP³ est un projet international, animé par l'Institut du Développement Durable et des Relations Internationales (IDDRI) et le Sustainable Development Solutions Network (SSDN), qui vise à déterminer les politiques nécessaires tant au niveau national qu'international permettant de limiter le réchauffement climatique à 2°C. A ce jour, 15 pays représentant plus de 70% des émissions mondiales de gaz à effet de serre participent au projet : Afrique du Sud, Allemagne, Australie, Brésil, Canada, Chine, États-Unis, France, Inde, Indonésie, Japon, Mexique, République de Corée, Royaume-Uni, Russie. L'administration Suisse et plus précisément l'Office Fédéral de l'Environnement a décidé d'intégrer le projet et donc de proposer une trajectoire sobre en carbone.

La structure du papier est la suivante : Dans une deuxième section, nous présentons le modèle économique GEMINI-E3 utilisé pour réaliser les simulations. La troisième section détaille les hypothèses sous-jacentes aux scénarios et leurs résultats sont présentés dans la quatrième section. Une section finale apporte des éléments de discussion et de conclusion.

II. Le modèle GEMINI-E3

GEMINI-E3 est un modèle calculable d'équilibre général qui décrit l'ensemble de l'économie mondiale à travers différentes régions et différents secteurs économiques. Ce modèle a été spécialement conçu pour l'évaluation de politiques énergétiques et climatiques et a donné lieu à plus d'une trentaine de publications scientifiques. Pour une description précise du modèle, on pourra se référer à Bernard et Vielle (2008)⁴. La version du modèle utilisée pour cette étude détaille 5 pays/régions et 11 secteurs/biens économiques qui sont présentés dans le Tableau 1.

³ Plus d'informations sur le DDPP peuvent être trouvées sur son site internet : <http://unsdsn.org/what-we-do/deep-decarbonization-pathways/>

⁴ On pourra aussi consulter pour plus de détails le site internet dédié au modèle : <http://gemini-e3.epfl.ch/>

Tableau 1 : Nomenclatures sectorielle et régionale

Secteurs/biens	Pays/régions
01 Charbon	CHE Suisse
02 Pétrole brut	EUR Union Européenne (28)
03 Gaz naturel	USA Etats-Unis
04 Produits pétroliers	BIC Brésil, Russie, Inde et Chine
05 Electricité	ROW Reste du Monde
06 Agriculture	
07 Industries intensives en énergie	
08 Autres biens et services	
09 Transport terrestre	
10 Transport maritime et fluvial	
11 Transport aérien	

III. Les hypothèses des scénarios

Définition des scénarios

Nous avons défini deux scénarios :

1. Le premier scénario appelé « scénario de référence » suppose que la Suisse atteint l'objectif de réduction des gaz à effet de serre défini pour l'horizon 2020 en utilisant les instruments économiques tels qu'ils ont été proposés, soit une réduction de 20% des émissions de CO₂ par rapport à celles de l'année 1990. Après 2020, nous supposons que les instruments mis en place demeurent à leurs niveaux de 2020 et qu'aucun objectif supplémentaire n'est adopté.
2. Le second scénario appelé « scénario DDP », suppose qu'après 2020 la Suisse s'engage vers une économie sobre en carbone et atteint en 2050 un niveau d'émission par habitant égal à une tonne de CO₂ (sans celles du transport aérien international). Plusieurs variantes de ce scénario sont analysées par la suite.

Suivant la loi suisse sur le CO₂, les objectifs ont trait à l'ensemble des émissions de CO₂ à l'exception de celles liées à l'aviation internationale. Par ailleurs, par soucis de simplification, l'ensemble des scénarios présentés ici suppose qu'aucune politique climatique n'est mise en place dans les autres pays du monde. Jusqu'en 2020, tous les scénarios reposent sur un ensemble commun d'hypothèses principalement tiré de la dernière communication de la Suisse à la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (Swiss Confederation (2013)). Ces hypothèses communes sont les suivantes :

1. La sortie du nucléaire est mise en œuvre ;
2. Le programme de rénovation énergétique des bâtiments est étendu jusqu'en 2020. Celui-ci suppose que 200 millions de CHF par an sont dépensés pour subventionner des rénovations énergétiques ;
3. La régulation des émissions des véhicules de transport est mise en place jusqu'en 2020. Pour les nouveaux véhicules cela se traduit par un objectif d'émissions moyennes de 95 grammes par kilomètre en 2020 ;
4. Les véhicules électriques pénètrent significativement le parc automobile et représentent en 2020 5% du parc automobile et 40% en 2050 ;

5. Un système d'échange de quotas d'émission (SEQE) pour le CO₂ est mis en place pour les industries intensives en énergie (secteurs 5 et 7 du modèle). La quantité d'émission allouée décroît de 1.74% par an ;
6. La taxe sur le CO₂ (qui s'applique aux émissions stationnaires à l'exclusion de celles concernées par le SEQE) est utilisée pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de CO₂ ;
7. Pour les transports, les importateurs de produits pétroliers doivent compenser une partie des émissions liées à l'usage des carburants. Cette compensation est financée par une taxe sur les carburants. La part compensée est de 2% en 2014-2015, 5% en 2016-2017, 8% en 2018-2019 et 10% en 2020.

Après 2020, les deux scénarios divergent. Les scénarios DDP supposent qu'une taxe uniforme sur le CO₂ est mise en place afin d'atteindre les objectifs définis ci-dessus. Au contraire le scénario de référence suppose que tous les instruments utilisés jusqu'en 2020 demeurent effectifs et égaux à leurs niveaux de 2020. La Figure 1 retrace les émissions de CO₂ du scénario de référence ainsi que ceux des scénarios DDP.

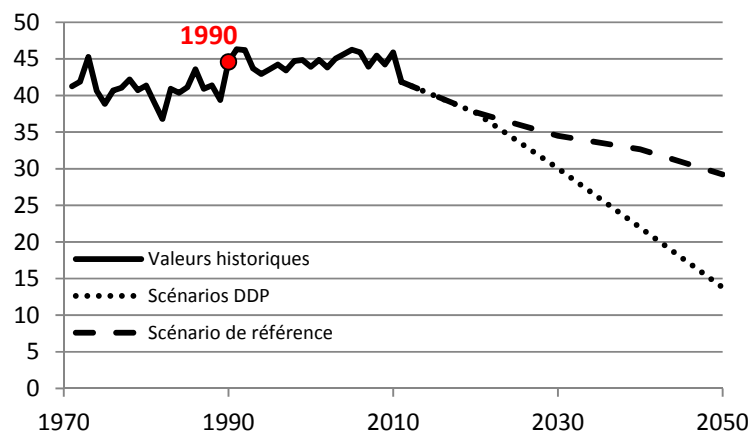


Figure 1 : Emissions suisses de CO₂ en Mt de CO₂ (y.c. transport aérien international)

Hypothèses sur l'environnement économique

Tous les scénarios utilisent un même ensemble d'hypothèses ayant trait à l'environnement économique et plus particulièrement à la démographie, la croissance économique et les prix de l'énergie. Elles sont résumées dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Hypothèses sur l'environnement économique

	2020	2030	2040	2050
Population suisse (en milliers)	9 225	9 568	9 820	9 999
Prix du pétrole brut (\$ ₂₀₁₂ /baril)	120.0	136.0	150.9	161.8
Prix du gaz naturel (\$ ₂₀₁₂ /MBtu)	12.4	13.4	14.6	15.1
	2010-2020	2020-2030	2030-2040	2040-2050
PIB suisse (TCAM en %)	1.3%	0.7%	0.8%	0.7%

Hypothèses sur la production d'électricité

Après l'accident nucléaire de Fukushima en 2011, le gouvernement suisse a décidé de plus recourir à l'atome pour la production d'électricité. Ce moratoire nucléaire suppose donc qu'aucune nouvelle centrale ne sera construite en Suisse. Concernant les cinq réacteurs existants, ceux-ci peuvent continuer à être utilisés sans qu'une durée de vie précise ait été fixée. L'opérateur de la centrale de Mühleberg a cependant décidé d'arrêter ce réacteur en 2019. Pour les quatre autres réacteurs, les scénarios ci-après retiennent une hypothèse de durée de vie de 60 ans. En 2045, tous les réacteurs nucléaires auront donc été déconnectés du réseau électrique suisse.

La Suisse a par ailleurs la volonté de développer l'usage des renouvelables dans la production d'électricité. Un rapport réalisé par l'Office Fédéral de l'Énergie (OFEN (2012)) détaille les potentiels de développement de ces énergies qui sont par ailleurs donnés dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Potentiels d'énergie renouvelable en GWh

Solaire photovoltaïque	14 000
Éolien	4 012
Géothermie	4 378
Biomasse et biogaz	4 000
Nouvelle hydraulique	3 160
Autres	2 163

Les coûts de ces énergies renouvelables proviennent des perspectives énergétiques suisses (Prognos (2012)) et sont présentés dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Coûts de production d'électricité renouvelable en centimes de CHF par kWh

	2010	2020	2030	2040	2050
Hydraulique	8.9	10.8	11.5	10.9	11.1
Solaire photovoltaïque	31.7	16.4	13.0	11.1	9.9
Eolien	24.1	20.1	15.7	13.9	12.0
Géothermie	12.3	10.5	9.8	9.2	8.6

Enfin concernant la technologie de capture et stockage du CO₂ (CSC), nous retenons un coût total (incluant la captation, le transport et le stockage) de 100 \$ par tonne de CO₂. Cette technologie est supposée disponible à partir de l'année 2025. Les capacités de stockage suisses sont évaluées à 2 680 millions de tonnes de CO₂ (Diamond et alii (2010)).

IV. Les résultats des simulations

Le scénario de référence

Le Tableau 5 donne les prix du CO₂ calculés par le modèle. En 2020, la taxe CO₂ serait de 60 CHF soit son niveau actuel. Les mesures sectorielles et les progrès techniques introduits dans le modèle permettraient d'atteindre l'objectif de baisse des émissions en 2020 sans augmentation du prix du CO₂. Le prix du permis de CO₂ pour les secteurs participant au SEQE serait de 40 CHF en 2020 ; cette augmentation par rapport au prix actuel proche de zéro serait principalement due à la pénétration du gaz naturel dans la production d'électricité (4 TWh serait ainsi produit à partir de cette énergie). La taxe sur les carburants

routiers s'établirait à 2 centimes de CHF par litre. Après 2020, ces prix resteraient constants et égaux à leurs niveaux de 2020.

Tableau 5 : Prix du CO₂ par tonne et taxe sur les carburants par litre (CHF₂₀₁₃) – Scénario de référence

	2020	2030	2040	2050
Taxe sur le CO ₂	60	60	60	60
Prix du CO ₂ SEQE	40	40	40	40
Taxe sur les carburants routiers	0.02	0.02	0.02	0.02

La Figure 2 donne les émissions de CO₂ sur la période de simulation par secteur. En 2050, les émissions helvétiques (incluant celles de l'aviation internationale) seraient de 29.2 Mt de CO₂, soit 22.5% en dessous de celles de 1990. Cela représenterait, sans les émissions du transport aérien, 2.5 tonnes par habitant en 2050. Tous les secteurs contribuent à la baisse des émissions. Le mix énergétique de la production d'électricité est présenté dans la Figure 3. La production d'électricité nucléaire est graduellement remplacée par du gaz naturel et des renouvelables. La production totale s'établit en 2050 à 78 TWh. Cette augmentation de la consommation d'électricité (0.3% par an) est principalement due à la pénétration de l'électricité dans les transports routiers et à la substitution de l'énergie fossile par de l'électricité pour des usages de chauffage (pompes à chaleur).

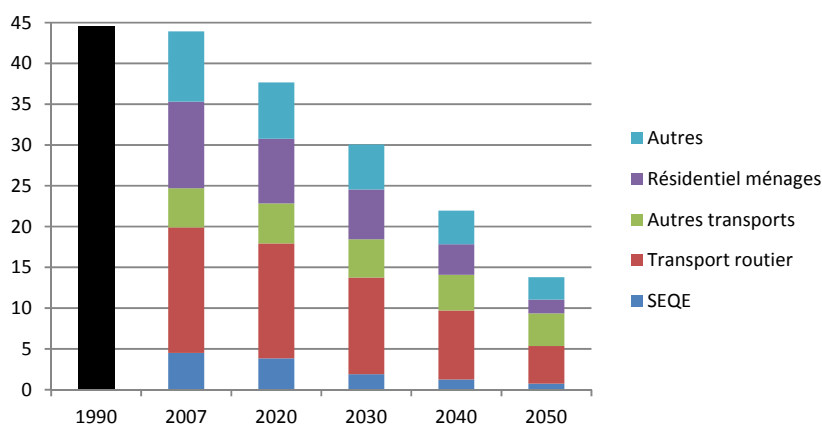


Figure 2 : Emissions de CO₂ en Mt de CO₂ – Scénario de référence

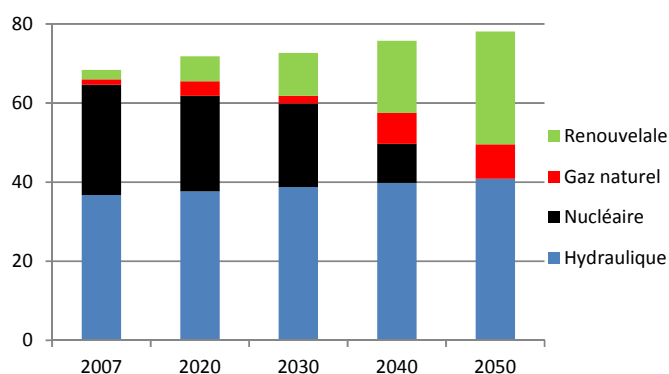


Figure 3 : Production d'électricité en TWh – Scénario de référence

Le scénario DDP

Nous supposons maintenant qu'après 2020 un prix unique sur le CO₂ est mis en place afin d'obtenir graduellement un niveau d'émission d'une tonne par habitant. Pour atteindre cet objectif, la taxe devrait s'établir en 2050 à 1556 CHF par tonne de CO₂. Comme l'indique le Tableau 6, la taxe croît très fortement après 2020. Un résultat similaire est obtenu par des modèles analysant la stratégie européenne (Cf. l'exercice EMF28, Weyant et alii (2013)). Le coût du scénario DDP est estimé en 2050 à 1.7% de la consommation des ménages.

Tableau 6 : Prix du CO₂ par tonne et taxe sur les carburants par litre (CHF₂₀₁₃) et coût en bien-être – Scénario DDP

	2020	2030	2040	2050
Taxe sur le CO ₂	60			
Prix du CO ₂ SEQE	40			
Taxe sur les carburants routiers	0.02			
Taxe uniforme sur le CO ₂		257	654	1556
Coût en % de la cons. des ménages		0.4%	0.9%	1.7%

Les émissions de CO₂ baisseraient de manière linéaire entre 2020 et 2050, l'objectif pour 2020 apparaissant cohérent avec la trajectoire DDP. Tous les secteurs contribuent à l'abattement, à l'exception du secteur de l'aviation internationale qui par définition n'est pas taxé. Par hypothèse, les émissions liées à la production d'électricité avec du gaz naturel sont dans leur totalité séquestrées à partir de 2025. Cela représente 77 Mt de CO₂, soit 3% de la capacité des réservoirs suisses. La décarbonisation de l'économie suisse (cf. Figures 4 et 5) est en partie réalisée par une augmentation de la consommation d'électricité produite à partir de gaz naturel et de renouvelables dont le potentiel maximum est complètement utilisé en 2050. En 2050, 90 TWh d'électricité est produit, soit une augmentation de 15% par rapport au scénario de référence. 21 TWh sont produits avec du gaz naturel. En 2050, la consommation d'électricité due à la mobilité électrique représenterait 15 TWh. La Figure 6 présente les émissions de CO₂ en 2050 par secteur, le transport représentant la moitié des émissions résiduelles de CO₂.

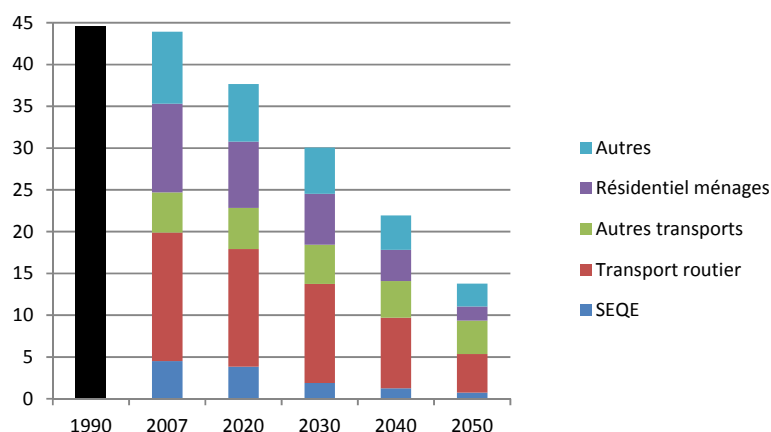


Figure 4 : Emissions de CO₂ en Mt de CO₂ – Scénario DDP

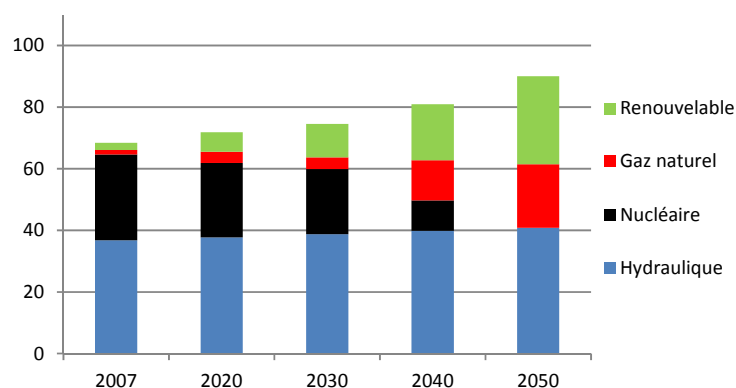


Figure 5 : Production d'électricité en TWh – Scénario DDP

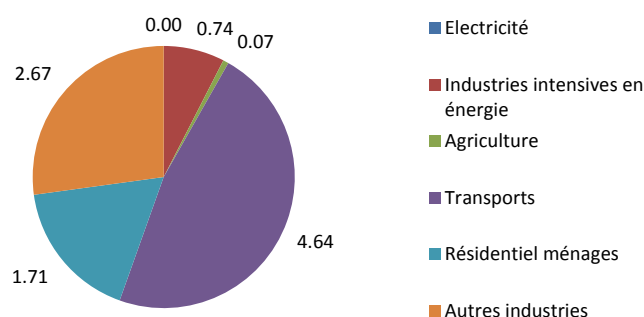


Figure 6 : Emissions de CO₂ en Mt de CO₂ pour l'année 2050 (hors aviation internationale) – Scénario DDP

Le scénario DDP sans CSC

Le précédent scénario montre une contribution importante de la CSC pour parvenir à atteindre l'objectif de baisse des émissions. Cependant cette technologie est sujette à plusieurs incertitudes (technologique, économique, etc). Son acceptabilité sociale est aussi incertaine d'autant plus que les réservoirs de stockage en Suisse se situent sous les zones urbanisées. C'est pourquoi nous avons simulé un scénario qui ne recourt pas à cette technologie.

L'ensemble du potentiel des renouvelables étant déjà utilisé pour la production d'électricité, le reste de la production électrique doit être assuré par des turbines à gaz. Cela induit des émissions de CO₂, ce qui nécessite d'augmenter la taxe sur CO₂ par rapport au scénario précédent pour atteindre le même objectif d'émissions. Ce prix augmente et atteint 2652 CHF en 2050. Le coût en bien-être s'établit à 1.9% de la consommation des ménages. Comme l'indique la Figure 8, la taxation du gaz naturel utilisé pour la génération d'électricité limite l'augmentation de la consommation d'électricité par rapport au scénario précédent, dont le niveau atteint celui du scénario de référence. Cette augmentation des émissions de CO₂ du secteur électrique qui atteignent 2.4 Mt de CO₂ en 2050 (Cf. Figure 9) requiert bien évidemment un surcroît d'abattement des autres secteurs comme le montrent les Figures 7 et 9.

Tableau 7 : Prix du CO₂ par tonne et taxe sur les carburants par litre (CHF₂₀₁₃) et coût en bien-être –
Scénario DDP sans CSC

	2020	2030	2040	2050
Taxe sur le CO ₂	60			
Prix du CO ₂ SEQE	40			
Taxe sur les carburants routiers	0.02			
Taxe uniforme sur le CO ₂		324	1040	2652
Coût en % de la cons. des ménages		0.4%	1.0%	1.9%

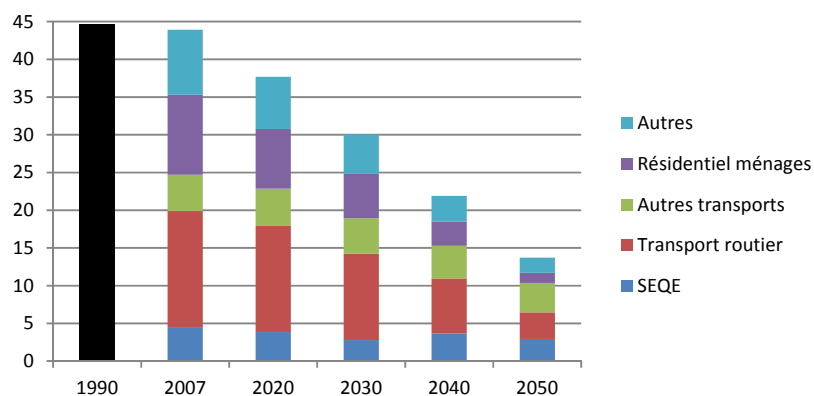


Figure 7 : Emissions de CO₂ en Mt de CO₂ – Scénario DDP sans CSC

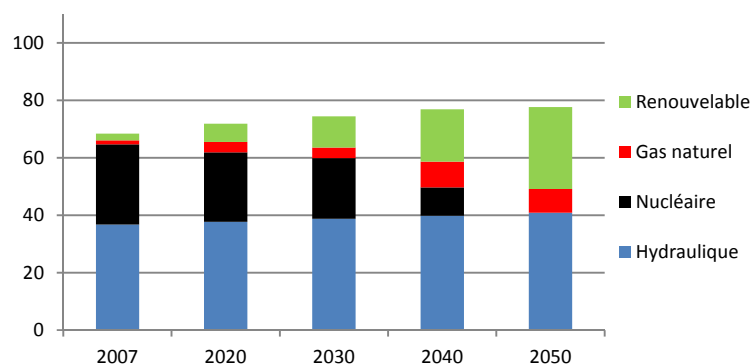


Figure 8 : Production d'électricité en TWh – Scénario DDP sans CSC

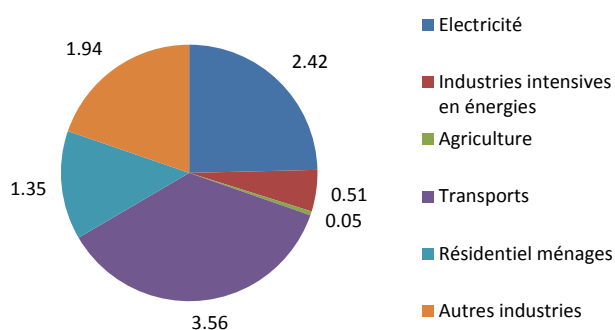


Figure 9 : Emissions de CO₂ en Mt de CO₂ pour l'année 2050 (hors aviation internationale) – Scénario DDP sans CSC

Le scénario DDP avec une contrainte sur la consommation d'électricité

Une des conclusions du scénario DDP est que la décarbonisation de l'économie suisse est atteinte à travers une augmentation de l'électricité qui se substitue en partie à des énergies fossiles. Cette augmentation de la consommation d'électricité nécessite l'importation de gaz naturel ce qui est en partie en contradiction avec la stratégie énergétique suisse qui vise à limiter sa dépendance énergétique et donc ses importations d'énergies fossiles.

Nous considérons ici un nouveau scénario qui autorise la CSC mais couple à la contrainte d'émission de CO₂ une contrainte relative à la consommation d'électricité. En effet l'amendement de la loi sur l'énergie prévoit une décroissance la consommation d'électricité par habitant de 3% en 2020 et de 13% en 2035 par rapport à son niveau de 2000. Nous prolongeons ces objectifs en 2050, par une baisse de 18% par habitant ce qui représenterait en 2050 une consommation d'électricité de 63 TWh.

Le scénario suppose donc une nouvelle contrainte sur la consommation d'électricité qui est atteinte par une taxe sur les consommations d'électricité intermédiaires et finales. Comme le montre la Figure 10, la production d'électricité serait relativement stable sur la période de simulation. En 2050, la production d'électricité serait réalisée par des moyens hydrauliques et des renouvelables sans recours à des énergies fossiles. La taxation de l'électricité nécessiterait d'augmenter le prix du CO₂ par rapport au scénario DDP qui atteindrait 1963 CHF. La taxe sur la consommation d'électricité s'établirait à 88% en 2050. Cela permettrait de diminuer la perte de bien-être par rapport au scénario DDP à 1.5% de la consommation des ménages en 2050. Cela s'explique en partie, par la baisse des importations de gaz naturel qui génère des gains à l'échange limitant ainsi le coût du scénario. Il faut noter qu'un résultat similaire est obtenu par le modèle GENESwIS (Maire et alii (2015)) pour la Suisse dans un scénario à configuration proche.

Tableau 8 : Prix du CO₂ par tonne et taxe sur les carburants par litre (CHF₂₀₁₃) et coût en bien-être –
Scénario DDP avec contrainte sur la consommation d'électricité

	2020	2030	2040	2050
Taxe sur le CO ₂	60			
Prix du CO ₂ SEQE	40			
Taxe sur les carburants routiers	0.02			
Taxe uniforme sur le CO ₂		299	787	1963
Taxe sur l'électricité		18%	41%	88%
Coût en % de la cons. des ménages		0.4%	0.6%	1.5%

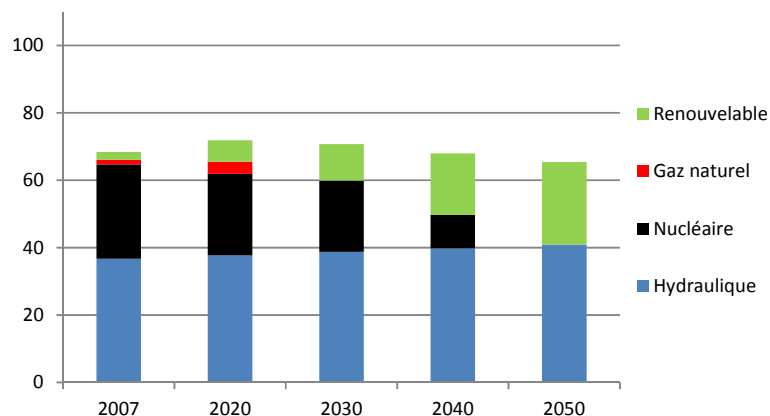


Figure 10 : Production d'électricité en TWh – Scénario DDP avec contrainte sur la consommation d'électricité

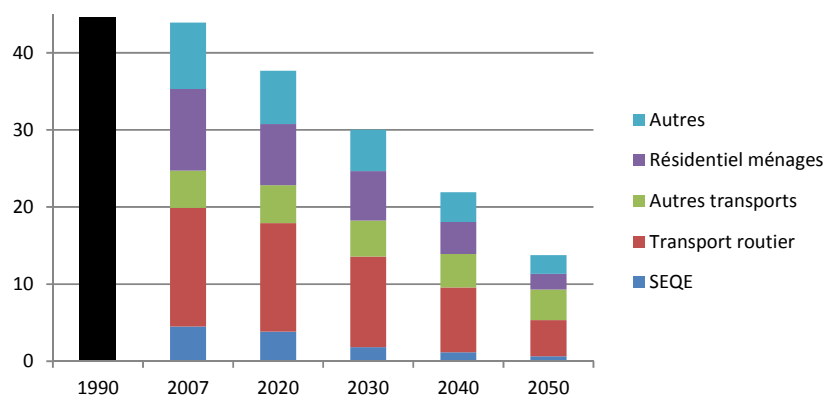


Figure 11 : Emissions de CO₂ en Mt de CO₂ – Scénario DDP avec contrainte sur la consommation d'électricité

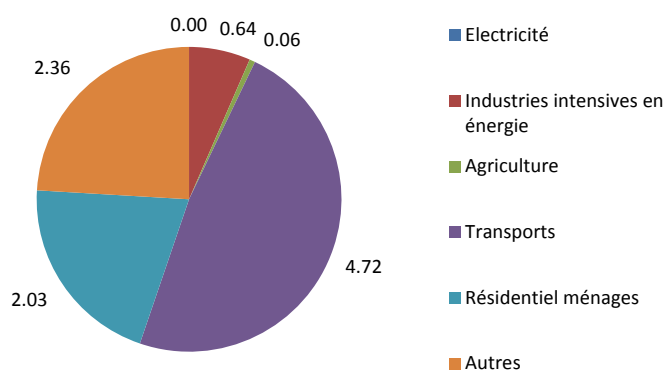


Figure 12 : Emissions de CO₂ en Mt de CO₂ pour l'année 2050 (hors aviation internationale) – Scénario DDP avec contrainte sur la consommation d'électricité

V. Conclusion

Les simulations réalisées ci-dessus permettent de tirer un certain nombre d'enseignements sur les enjeux d'une décarbonisation profonde de l'économie suisse. Tout d'abord, si l'objectif helvétique de 1 tonne de CO₂ par habitant en 2050 est ambitieux, nous montrons qu'il peut être atteint. Le coût cumulé est estimé à environ 1% de la consommation des ménages suisses, ce qui représente une charge importante. Ce coût est important car il combine à la fois une réduction forte des émissions de CO₂ à une sortie du nucléaire dans la production d'électricité qui bien évidemment rend l'objectif plus difficile à atteindre. Le coût atteint en 2050 1.7% de la consommation des ménages, soit un coût relativement plus faible que ceux calculés pour l'ensemble de l'Europe dans le projet FP7 AMPERE pour des objectifs de réduction similaires et qui vont de 2% à 9.5% du PIB. En 2050, la taxe sur le CO₂ serait de 1500 CHF, un prix comparable à ceux trouvés dans l'exercice EMF28 (Weyant et alii (2013)) où les prix pour l'Europe vont de 240 à 1127 € avec une valeur médiane de 521 €.

Cette décarbonisation profonde de l'économie suisse nécessite un effort de tous les secteurs économiques. Elle requiert une substitution des énergies fossiles par de l'électricité et un recours à des gains d'efficacité énergétique à travers l'adoption de technologies sobres en carbone (véhicules électrique, isolation des bâtiments, pompes à chaleur, etc). Enfin, nous montrons de plus que différentes voies peuvent être utilisées pour atteindre cet objectif, avec ou sans CSC, en adoptant ou non une contrainte supplémentaire sur la consommation d'électricité. Si ces différentes options ont un impact important sur le devenir du système énergétique Suisse, elles ne modifient pas de façon significative son coût macro-économique.

Références

- A. Bernard and M. Vielle (2008). GEMINI-E3, a General Equilibrium Model of International National Interactions between Economy, Energy and the Environment. *Computational Management Science*, 5(3):173-206, May.
- L. Diamond, W. Leu, et G. Chevalier (2010). Potential for geological sequestration of CO₂ in Switzerland. Bundesamt für Energie BFE.
- S. Maire, R. Pattupara, K. Ramachandran, M. Vielle, and F. Vöhringer (2015). Electricity markets and trade in Switzerland and its neighbouring countries (ELECTRA). Technical report, Econability, PSI, EPFL.
- OFEN (2012). Conseil fédéral. Potentiel des énergies renouvelables dans la production d'électricité.
- Prognos (2012). Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050 - Energienachfrage und Elektrizitätsangebot in der Schweiz 2000-2050. Study commissioned by the Swiss Federal Office of Energy, Basel.
- Swiss Confederation (2013). Switzerland's Sixth National Communication and First Biennial Report under the UNFCCC.
- J. Weyant, B. Knopf, E. de Cian, I. Keppo, and D. van Vuuren (2013). Introduction to the EMF28 Study on scenarios for transforming the European energy system. *Climate Change Economics*, 4, 15, 25.